

发芽燕麦淀粉的热特性

田斌强^{1,2}, 邓乾春³, 谢笔钧²

(1. 河南农业大学烟草学院, 河南郑州 450002) (2. 华中农业大学食品科技学院, 湖北武汉 430070)

(3. 中国农业科学院油料作物研究所, 湖北武汉 430062)

摘要:发芽是进一步提升谷物种子营养价值的重要手段, 已经成为当前谷物研究的新热点。本文以晋燕八号燕麦为原料, 通过在 16 °C 浸泡并避光发芽, 分别提取不同时间段的燕麦淀粉, 用差示扫描量热 (differential scanning calorimetry, DSC) 和热重分析 (thermogravimetric analysis, TGA) 两种手段对原燕麦和发芽后燕麦淀粉的热特性进行表征。结果发现, 发芽对燕麦中淀粉的起始糊化温度影响不大, 在发芽 144 h 内, 平均起始糊化温度为 57.44±0.48 °C, 但发芽 72 h 以后的燕麦中淀粉糊化温度范围扩大, 以发芽 72 h 为界, 前后两段的糊化焓都是逐渐增加的, 这可能提示发芽期间淀粉结构存在由无序到有序的交替变化过程; 氮气氛围下, 淀粉的分解温度在 275~363 °C 之间, 此温度区间内淀粉的质量损失为 65%~73%; 发芽淀粉热分解反应活化能比原燕麦淀粉均有降低, 其中原燕麦淀粉的热分解活化能为 219.44±14.46 kJ/mol, 活化能最小的为发芽 144 h 的淀粉, 其值为 157.75±5.58 kJ/mol, 各发芽阶段淀粉热分解反应级数均为一级。

关键词: 燕麦; 发芽; 淀粉; 差示扫描量热; 热重分析

文章编号: 1673-9078(2014)5-98-103

Thermal Properties of the Starch from Germinated Oat

TIAN Bin-qiang^{1,2}, DENG Qian-chun³, XIE Bi-jun²

(1.College of Tobacco Science, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China) (2.College of Food Science & Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China) (3.Oil Crops research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430062, China)

Abstract: Germination is an important method to enhance grain seed value. In this research, Jinyan VIII oat was soaked and germinated at 16°C in the dark, then starches were extracted from raw and germinated oat at different time. Their thermal properties of starches were characterized by differential scanning calorimetry and thermogravimetric analysis. The results showed that germination had little effect on start gelatinization temperature, the average temperature was 57.44 °C within 144 h germination, but the range of gelatinization temperature expanded when germinating was beyond 72 h. Moreover, all the gelatinization enthalpies before and after 72 h germination period increased with time increasing, which suggested that there was an alternating change of the starch structure from disorder to order during germination. Under nitrogen atmosphere, the decomposition temperature of starch was within 275-363 °C and mass loss of starch was 65~73% among the temperature range. Decomposition activation energy of the raw oat starch was higher than that of soaked and germinated samples. And the minimum activation energy presented in 144 h sample was 157.75 kJ/mol while the value of raw starch was 219.44 kJ/mol. In addition, reaction orders of all samples were of the first reaction level.

Key words: oat; germination; starch; differential scanning calorimetry; thermogravimetric analysis

燕麦按籽粒带稃与否可分为皮燕麦和裸燕麦, 其中, 裸燕麦起源于中国, 我国现有燕麦品种资源中含裸燕麦1924份, 山西、河北、内蒙古是我国的主产区^[1]。燕麦中蛋白质和油脂含量高, 并富含β-葡聚糖, 葱酰胺等功效成分, 已经吸引了众多研究者的追捧。

研究发现, 发芽是进一步提高燕麦功能价值的重

收稿日期: 2013-12-28

基金项目: “十一五” 国家科技支撑计划项目 (2006BAD27B09)

作者简介: 田斌强 (1976-), 男, 博士, 讲师, 研究方向为天然产物化学

通讯作者: 谢笔钧 (1943-), 女, 教授, 研究方向为天然产物化学

要手段, 通过发芽可以提升燕麦中赖氨酸含量, 使可溶性蛋白质含量增加, 植酸酶活性增强, 谷甾醇和B族维生素含量能增加20%^[2]。尽管, 直链淀粉、支链淀粉和总淀粉的含量均随着发芽的进行呈下降趋势^[3], 但是, 适度的发芽可增加淀粉的透明度, 增强淀粉糊的热稳定性和冷稳定性, 并使燕麦淀粉的溶解度增加, 膨胀度减小^[4]。目前, 对于发芽过程中淀粉特性的研究还十分少。

热处理是食品加工贮藏中十分重要的加工过程, 不管是烹调、杀菌还是干燥、冷藏都存在食品对热源

的反应和适应。淀粉是谷物类食品的主要成分,其热特性研究在食品中非常重要,DSC技术是最为常用的分析手段之一。它可用于食品中蛋白质的热变性,食品中水分含量的测定,食品中脂类物质的熔点和结晶动力学,玻璃态转变温度,成分之间的相互作用。该技术也应用于淀粉,主要研究淀粉的糊化,老化以及淀粉与蔗糖单酯的作用等^[5]。

一般用淀粉进行食品加工和热塑材料制备都是在相当高的温度下进行的,其中淀粉中分子结构的破坏有赖于所采用的技术以及该技术下所用温度和时间^[6]。通过热重分析可以快速、简便分析高聚物的稳定性,为正确地选择高聚物的加工温度区间和高聚物材料的使用温度极限提供依据^[7]。目前,还没有研究涉及燕麦中淀粉的热分解动力学。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

实验所用裸燕麦品种为晋燕八号,由山西省农科院高寒植物研究所李刚老师提供。所用化学试剂为分析纯。DSC为TA公司Q2000型,热重分析仪为TA公司TG50型。

1.2 实验方法

1.2.1 燕麦发芽与淀粉提取

燕麦发芽方法参见^[8]。未发芽燕麦提取流程为:燕麦粉碎过筛,石油醚脱脂,反复用0.01 M NaOH脱蛋白,滤渣后离心,弃上清和沉淀上层的深色物质,得到的湿淀粉用HCL溶液调节pH至中性,用清水洗涤3次并离心,沉淀物在40℃鼓风干燥箱中干燥过夜。干燥后的淀粉研磨成细粉,过160目筛待用。发芽燕麦淀粉的提取办法与未发芽燕麦淀粉提取办法所不同的是,将发芽过程中的燕麦鲜样直接加NaOH溶液在粉碎机中粉碎,再进行其他后续提取过程。

1.2.2 燕麦淀粉的DSC分析

用热重分析仪称取试样量为2.5 mg淀粉样品放入DSC测试盒,加入5 μL去离子水,用聚四氟乙烯针搅拌均匀,再用仪器配套压盖器压盖密封,4℃放置过夜,测试前平衡至室温,DSC分析仪测定时升温速率10℃/min,空盒作为参照。实验结果用仪器自带软件分析。

1.2.3 燕麦淀粉的热重分析

参考Guinesi^[6]等人的方法,用热重分析仪称取试样量为7 mg左右,置于铂金皿中,热天平N₂流速为40 mL/min,样品N₂流速为60 mL/min。TGA分别以

20、30、40和50℃/min的速率升温,扫描范围从40℃至700℃,测定各品种大米淀粉的热分解曲线。微分热重分析(derivative thermogravimetric analysis,DTA)曲线是用仪器自带软件直接对TGA曲线求导得出的。

1.2.4 燕麦淀粉热分解结果分析的理论依据

主要参考了张俐娜等人的理论方法^[7]。单步进行的固体降解数据的数学描述都会用到有3个动力学术语:活化能E,频率因子A(也叫指前因子)和转换分数α的函数f(α),用他们来拟合试验数据得到下面的公式:

$$\frac{d\alpha}{dt} = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) f(\alpha) \quad (1)$$

对于在恒定加热速率下获得的动态数据,β=dT/dt,方程(1)可以变成:

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{A}{\beta} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) f(\alpha) \quad (2)$$

这里R为气体常数8.314 J/(K·mol)。求解动力学参数的方法有多种,图解法是其中最简单的方法之一。对上式(2)进行积分得到:

$$F(\alpha) = \frac{A}{\beta} \int_{T_a}^{T_b} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) dT \quad (3)$$

采用Doyle近似(lg p(x) = -2.315 - 0.4567x,其中(x = E/RT))^[9],得到:

$$\lg F(\alpha) = \lg \frac{AE}{R\beta} - 2.315 - 0.457 \frac{E}{RT} \quad (4)$$

假设淀粉的热分解符合无规引发模型,以及最小不挥发聚合度为2,则热分解挥发速率可以简化为:

$$\frac{d\alpha}{dt} = kf(\alpha) = 2k(\alpha^{\frac{1}{2}} - \alpha) \quad (5)$$

$$F(\alpha) = \ln\left(1 - \alpha^{\frac{1}{2}}\right)^{-1} \quad (6)$$

整理得到:

$$\lg[\lg(1 - \alpha^{\frac{1}{2}})^{-1}] = \lg \frac{AE}{2.3R\beta} - 2.315 - 0.457 \frac{E}{RT} \quad (7)$$

对于不同的α值,以lgβ对1/T作图(即Ozawa图)得到一组平行的直线,由直线斜率和截距计算得到淀粉活化能E和频率因子A值。

2 结果与讨论

2.1 燕麦淀粉的糊化性质

燕麦淀粉的DSC曲线如图1所示,从中可以看出,发芽前后燕麦淀粉的DSC曲线差别甚微,通过软件分析后得出的糊化参数见表1。显然,燕麦淀粉的起始糊化温度和糊化峰值温度在发芽前后没有任何显著差异,其值分别为57.44℃和61.26℃。Galdeano等^[10]

研究了品种为 IAC 的燕麦中淀粉的热特性, 结果表明糊化温度为 64.71 °C。Doublrier 等报道的燕麦淀粉糊化温度为 66.8 °C, 脱脂后的糊化温度为 69.5 °C, 燕麦油脂含量高, 则淀粉的糊化温度相对低^[11]。本研究所用的晋燕八号燕麦油脂含量达到 5.75%^[12], 所以, DSC 结果中的糊化温度较文献报道中的结果低。另外, 不同发芽时间燕麦中淀粉的糊化终止温度表现有较为清楚的差异, 通常提前或拖延 1~2 °C, 特别是发芽 72~144 h 燕麦中淀粉的糊化终止温度随发芽时间呈有规律的逐渐加大的延迟趋势。原淀粉的糊化焓为 8.92 J/g, 发芽或浸泡过的燕麦中淀粉的糊化焓都比未发芽燕麦大 0.3~2.4 J/g。以发芽 72 h 为界, 前后两段的糊化焓都是逐渐增加的, 说明这两个段发芽期内淀粉结构中的无序性结构部分容易而且最先被水解, 随着发芽进行, 结构的有序性不断增强, 当无序结构部分被分解到一

定程度, 暴露出来的有序结构部分突然崩塌, 产生新的无序结构。

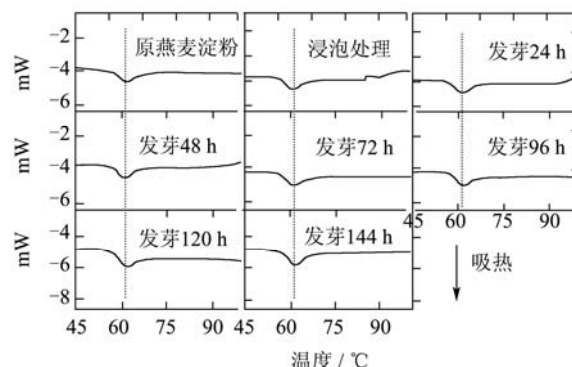


图1 发芽前后燕麦中淀粉的DSC曲线

Fig.1 DSC graph of starches isolated from raw and germinated oat

表1 发芽前后燕麦中淀粉的DSC测定结果的比较

Table 1 DSC results of starches isolated from raw, soaked and germinated oat

样品	起始糊化温度 To/°C	峰值糊化温度 Tp/°C	糊化终止温度 Tc/°C	Tc-To/°C	ΔH/(J/g)
原燕麦淀粉	57.55	61.67	73.10	15.56	8.92
浸泡处理	56.93	61.11	73.31	14.38	9.36
发芽 24 h	56.72	61.09	71.24	14.53	9.56
发芽 48 h	57.78	60.88	72.46	14.68	9.64
发芽 72 h	57.18	61.05	71.67	14.50	11.32
发芽 96 h	57.86	61.41	72.49	14.63	9.27
发芽 120 h	57.92	61.64	74.49	16.57	9.68
发芽 144 h	57.70	61.66	75.63	17.93	10.67
平均值±标准差	57.44±0.48	61.26±0.31	73.04±1.56	15.31±1.38	9.92±0.77

2.2 燕麦淀粉的热分解过程

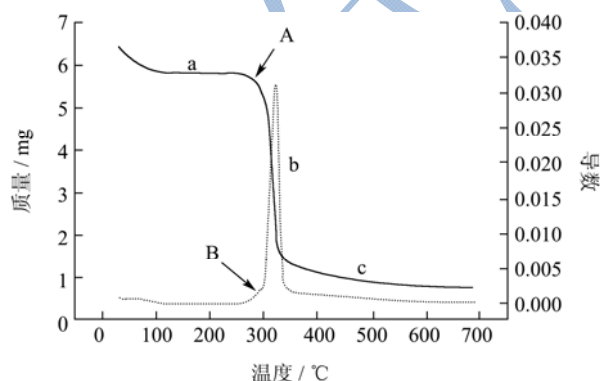


图2 典型的燕麦淀粉的热失重曲线

Fig.2 Typical TG-DTG plot of starch isolated from oat, monitored at 20°C/min under an atmosphere of flowing dry nitrogen.

图2 是本研究中得到的典型热重曲线及其微分曲线图。可见燕麦淀粉分解反应与其他人^[13-15]对与玉米的研究结果相近。淀粉在热重分析仪的随温度变化是

质量的变化过程被分为三个阶段: 150 °C以下属于水分蒸发阶段, 为第一阶段(图2中字母a所示), 第二阶段是淀粉在非氧化过程中的解聚和降解阶段^[14](图2中字母b所示), 这一阶段可以放出CO₂, CO, 水, 乙醛, 呋喃, 2-甲基呋喃。除了复杂的气体和水分释放之外, 解聚产物的主要成分是左旋葡萄糖。后面讨论中将这一步起始和终止温度称为分解反应起始和终止温度。第三阶段是中间产物在高温下的总降解(图2中字母c所示), 对于玉米淀粉来说, 碳残留物在氮气氛围中于500 °C形成^[13-14]。

对燕麦淀粉热失重曲线的进行微分即得到图2中B所指的DTG曲线。曲线前端凸起位置是淀粉中水分因加热散失导致的, 温度在实验起始温度至150 °C以下。150 °C~275 °C阶段DTG曲线呈水平直线状, 说明淀粉在这一温度较为稳定。温度继续升高, 淀粉开始分解, DTG曲线出峰, 曲线上点的纵坐标越大说明即时分解速度越大, 实验中最快反应速率对应温度就是依该曲线峰值点对应温度来表述的。超过350 °C,

分解反应速率下降而趋于平稳。

研究中还有一个现象值得注意，那就是在 DTG 图上主峰出现之前有一个不起眼的小峰，即图 2 中字母 B 所示位置，与之对应的是 TGA 图中的 A 所示位置。很多文献^[13-14]中都可以看到这一现象，但是还没有研究者对这一现象加以研究和讨论。动态加热速率即在样品未裂解或裂解完毕后以较高的加热速率加热，而在裂解时降低加热速率从而避免升温过快影响解析度^[7]。所以，或许高分辨 TGA 中采用动态加热速率的操作方法有助于这个问题的解决。

2.3 不同加热速率下燕麦淀粉的热分解差异

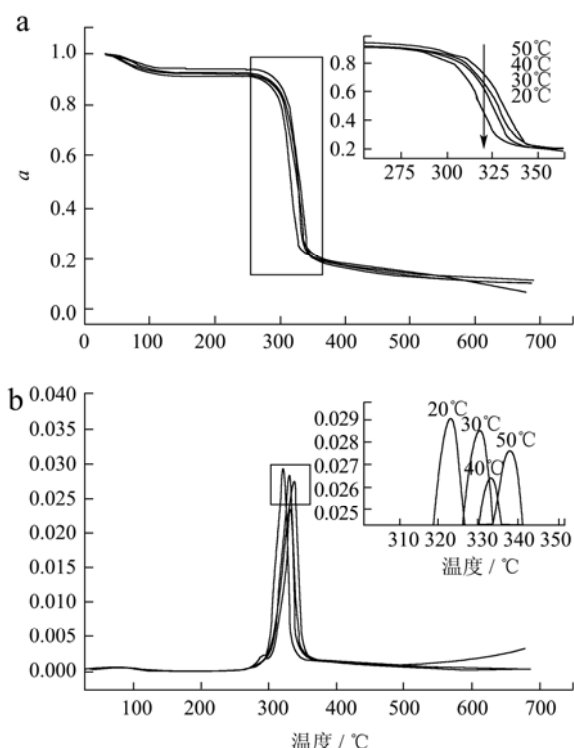


图 3 原燕麦中淀粉的 TGA (A)-DTG (B) 图

Fig. 3 TGA-DTG plot of raw oat starch in an atmosphere of flowing dry nitrogen

从原燕麦淀粉在不同升温速率下的 TGA-DTG 图 (图 3) 中可以看出，随升温速率加大，淀粉的热分解温区向更高温度偏移，升温速率每上升 10 °C，偏移量升高 3~7 °C 不等，受试的其他淀粉样品也有这样的现象 (见表 2)。这是因为反应物一定时，反应物的热传导速率一定，升温速率越小则反应物温度达到升温过程中仪器的即时温度所消耗的时间就越短，反之，升温速率越高则反应物温度滞后于升温过程中的即时温度就越明显。另外，所有样品的反应终止温度随升温速率变化的幅度大于起始反应温度随升温速率的变化。汪兰用 TG 研究了 10 个品种大米的热分解反应^[16]，Luciana 等^[6]研究了玉米，大米、土豆和木薯淀粉的热

分解反应，在升温速率为 5/10/15/20 °C/min，观察到的分解温度延迟现象与本研究基本一致。这两项研究在 20 °C/min 的加热速率下，大米最高的反应起始温度分别为 278 °C 和 274 °C，而玉米、土豆和木薯的反应起始温度分别为 290 °C、285 °C 和 297 °C，而黄东东等在 10 °C/min 升温速率下，发现其研究的某抗性淀粉反应起始温度也达到了 296.7 °C^[17]。这说明燕麦淀粉耐热性稍好于大米，但不及玉米、土豆、木薯淀粉和抗性淀粉。在热反应中原燕麦淀粉的活化能高于汪兰和 Luciana 等研究中其他淀粉的活化能。随着发芽时间的延长，燕麦中淀粉的活化能有较为明显的下降趋势 (表 2)，下降幅度 11.87%~28.11%。Luciana 指出形貌方面可能是活化能不同的原因，比如大米淀粉具有最高的活化能，这与大米淀粉团聚颗粒中分子间相互作用有关。燕麦淀粉是所有谷物中颗粒最小的，所以原燕麦中淀粉拥有较高的活化能。经过发芽后，淀粉颗粒受到侵蚀变小，分子间相互作用减弱，活化能下降。

不同升温速率下，燕麦淀粉的热分解温度有一定差异，对起始分解温度影响不明显，但可以加大影响最快反应速率对应温度和分解末尾温度。实验条件下，后者均提高了 15~18 °C。20 °C/min 升温速率下，燕麦淀粉的热分解温度在 278~348 °C 之间，该温度范围内，淀粉分解造成的质量损失约 70%，升温速率提高到 50 °C/min 时，热分解温度范围为 286~363 °C，这一温度范围内，淀粉分解引起的质量损失超过 70%。

2.4 发芽燕麦淀粉热分解动力学参数计算

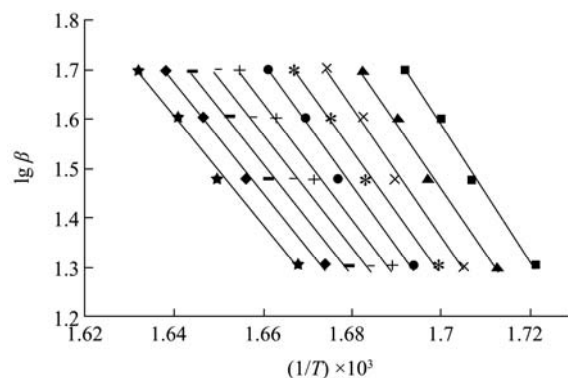


图 4 原燕麦淀粉的 Ozawa 图

Fig.4 Ozawa graph of raw oat starch using $\alpha = 0.25-0.70$ with 0.05 interval and heating rate at 20/30/40/50 °C/min

分别取 α 为 0.25~0.7，间隔 0.05，求得 $\lg\beta$ ，再以 $\lg\beta$ 对 $1/T$ 作图 (即 Ozawa 图) 得到一组平行的直线，如图 4 为原燕麦淀粉热分解的 Ozawa 图。由直线斜率和截距计算得到淀粉活化能 E 和频率因子 A 值 (表 2)。

频率因子反映的是反应过程中反应物分子相互碰撞的几率，频率因子越大反应速率越大。从表 2 中可

以看出发芽后样品的频率因子为波动减小。

将所获得燕麦淀粉分解反应活化能代入计算得到，

在活化能的计算过程中，为了能使在 $p(x)$ 中使用 Doyle 近似，所求得的结果必须满足 $28 \leq x = E/RT \leq 50$ ^[9]。若取反应起始温度 ($T=280\text{ }^\circ\text{C}=553\text{ K}$) 来计算，

$34 < x < 48$ ，可见计算过程中的近似是可取的，计算结果可信。

表 2 发芽前后燕麦淀粉的热分解动力学参数

Table 2 Reaction limits taken from TG plot to obtain kinetic parameters E and A regarding the second step of thermal degradation to oat starches

样品	升温速率 /($^\circ\text{C}/\text{min}$)	热分解温 度范围/ $^\circ\text{C}$	最快反应速率 对应温度/ $^\circ\text{C}$	质量损 失/%	活化能 /(kJ/mol)	频率因子 $\text{InA}/\text{min}^{-1}$
原燕麦淀粉	20	281-348	323.05	67.3	219.44±14.46	8.98
	30	284-359	330.55	69.3		
	40	286-358	333.29	68.3		
	50	286-363	338.02	72.5		
浸泡处理	20	282-347	322.36	67.4	191.50±7.61	7.88
	30	286-354	330.09	67.6		
	40	288-359	334.76	70.7		
	50	289-362	337.25	72.5		
发芽 24 h	20	281-345	320.61	66.1	193.83±7.66	8.01
	30	285-356	329.17	70.9		
	40	288-357	332.84	71.9		
	50	289-360	335.80	72.8		
发芽 48 h	20	280-347	321.30	66.7	183.61±5.95	7.58
	30	284-354	329.54	71.0		
	40	287-359	334.01	72.7		
	50	290-362	337.38	71.4		
发芽 72 h	20	282-343	317.85	65.9	165.16±3.85	6.89
	30	286-352	327.52	70.1		
	40	288-357	332.13	72.0		
	50	291-360	335.07	71.4		
发芽 96 h	20	281-344	319.09	66.3	167.24±6.19	6.95
	30	286-352	327.11	71.0		
	40	290-357	332.72	74.3		
	50	293-361	336.38	70.1		
发芽 120 h	20	280-345	319.10	68.7	163.56±7.33	6.81
	30	287-353	328.00	68.1		
	40	290-358	333.21	71.1		
	50	291-360	335.89	71.4		
发芽 144 h	20	278-348	320.90	69.1	157.75±5.58	6.57
	30	283-355	330.08	70.9		
	40	287-360	335.37	72.4		
	50	289-363	338.17	71.4		

2.5 反应级数的确定

根据张俐娜^[7]的介绍，还可用 Coast-Redfern 方法计算反应级数。对热分解动力学方程求定积分，得：

$$\int_0^\alpha \frac{d\alpha}{(1-\alpha)^n} = \frac{A}{\beta} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) dT$$

当 $n=1$ 时，经分离并两边取对数得到

$$\lg \left[\frac{-\ln(1-\alpha)}{T^2} \right] = \lg \left[\frac{AE}{R\beta} \left(1 - \frac{2RT}{E} \right) \right] - \frac{E}{2.3RT}$$

以 $\lg[-\ln(1-\alpha)/T^2]$ 对 $1/T$ 作图, 对于一级反应将得到直线关系。图 5 是对于 β 为 20 °C/min, $\alpha=0.25-0.70$ 所做的原燕麦淀粉的 Coast-Redfern 图, 其良好的线形关系表明原燕麦淀粉的热分解为一级反应。其他受试淀粉在不同加热速率下也都可以得到线形很好的 Coast-Redfern 图, 表明发芽前后燕麦中的淀粉在分解时都呈现一级反应。

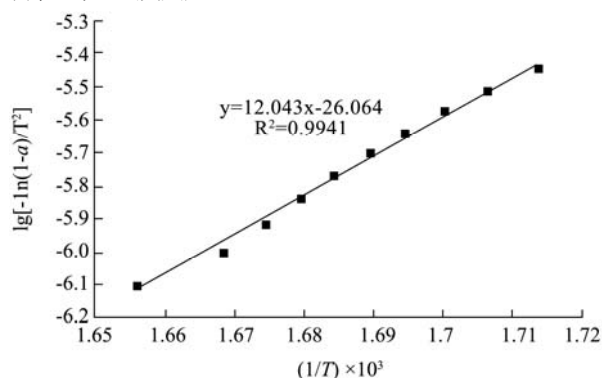


图 5 原燕麦淀粉的 Coast-Redfern 图

Fig.5 Coast-Redfern graph of raw oat starch at $\alpha=0.25-0.70$ with 0.05 interval and with heating rate of 20°C/min

3 结论

3.1 发芽对燕麦中淀粉的糊化起始温度影响不大, 在发芽 144 h 范围内, 其平均值分别为 57.45 ± 0.46 °C。在发芽后半期随发芽时间延长, 峰值温度和糊化终止温度升高, 糊化温度范围加大, 发芽后热焓值的升高表明发芽改变了淀粉颗粒结构, 形成了部分难糊化的淀粉聚集体。

3.2 实验条件下, 淀粉的热分解温度在 275~363 °C 之间, 不同升温速率下范围略有差异, 偏差为 15 °C 左右, 在热分解温度范围内, 质量损失为 65%~73%。

3.3 燕麦发芽后其淀粉的热分解反应活化能降低, 并随发芽时间延长显著下降 (由 219.44 ± 14.46 kJ/mol 减小到 157.75 ± 5.58 kJ/mol), 各样品的分解反应均属于一级反应。可见, 燕麦通过发芽可减小淀粉分子间的相互作用, 有利于其与水分子的相互作用。

参考文献

[1] 杨文宪. 莜麦新品种与高产栽培技术[M]. 太原: 山西人民出版社, 2006
YANG Wen-xian. Naked oats varieties and high-yield cultivation techniques [M]. Taiyuan: Shanxi People's Publishing House, 2006

[2] Anu Kaulovirta-Norja, Annika Wilhelmson, Kaisa Poutanen.

Germination: a means to improve the functional of oat [J]. Agricultural and Food Science, 2004, 13: 100-112

[3] 徐建国, 郝艳芳, 闫华娟, 等. 燕麦发芽过程中淀粉及其相关酶活性的动态变化[J]. 中国粮油学报, 2012, 27(4): 25-28
XU Jian-guo, HAO Yan-fang, YAN Hua-juan, et al. Dynamic changes in starch and relevant enzyme activity in oat groats during germination [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2012, 27(4): 25-28

[4] 徐建国. 燕麦发芽过程中淀粉理化特性的变化[J]. 中国粮油学报, 2012, 27(5): 27-31
XU Jian-guo. Changes in the physicochemical properties of starch in oats (*Avena nuda* L.) during germination [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2012, 27(5): 27-31

[5] 黄海. DSC 在食品中的应用[J]. 食品与机械, 2002, 88: 6-9
HUANG Hai. Application of DSC in food [J]. Food and Machinery, 2002, 88: 6-9

[6] Luciana S. Guinesi, Alessandra L. da Roz, Elisangela Corradini, et al. Kinetics of thermal degradation applied to starches from different botanical origins by non-isothermal procedures [J]. Thermochemica Acta, 2006, 447: 190-196

[7] 张俐娜, 薛奇, 莫志深, 等. 高分子物理近代研究方法[M]. 武汉大学出版社, 2006
ZHANG Li-na, XUE Qi, MO Zhi-shen, et al. Modern research method of polymer physics [M]. Wuhan University Press, 2006

[8] Binqiang Tian, Bijun Xie, John Shi, et al. Physicochemical changes of oat seeds during germination [J]. Food Chemistry, 2010 (119): 1195-1200

[9] Joseph H Flynn. The "temperature integral"-its use and abuse [J]. Thermochemica Acta, 1997, 300: 83-92

[10] Melicia Cintia Galdeano, Maria Victória Eiras Grossmanni, Suzana MALI, et al. Physicochemical properties of IAC 7 oat starch from Brazilian cultivars [J]. Ciênc. Tecnol. Aliment. Campinas, 2009, 29(4): 905-910

[11] Doublier J L, Patom D, Liams G. A reological investigation of oat starch pastes [J]. Cereal Chemistry, 1987, 64: 21-26

[12] 田斌强, 邓乾春, 郭珊珊, 等. 化学发光法对燕麦贮藏蛋白质抗氧化活性的评价[J]. 中国粮油学报, 2010, 25(1): 28-32
TIAN Bin-qiang, DENG Qian-chun, GUO Shan-shan, et al. Evaluating antioxidant effect of oat storage protein by chemiluminescence [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2010, 25(1): 28-32

[13] Aisha A A Soliman, Nabila A El-Shinnawy, Fardous Mobarak. Thermal behaviour of starch and oxidized starch [J].

- Thermochimica Acta, 1997, 296: 149-153
- [14] Poonam Aggarwal, David Dollimore. The effect of chemical modification on starch studied using thermal analysis [J]. Thermochimica Acta, 1998, 324: 1-8
- [15] 刘延奇,于九皋,孙秀萍.A-型淀粉球晶的制备及表征[J].中国粮油学报,2004,19:31-34
- LIU Yan-qi, Yu JIU-gao, SUN Xiu-ping. The preparation and characterization of A-type starch spherocrystals [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association. 2004, 19: 31-34
- [16] 汪兰.大米淀粉宏观性能、消化性及与水分子运动性的关系[D].武汉:华中农业大学,2008
- WANG Lan. Relationship between macroscopic properties, digestion of rice starch and water molecular mobility [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2008
- [17] 黄东东,寇秀颖,王学文,等.知名抗性淀粉的热性质分析[II][J].现代食品科技,2007.23(2):82-83
- HUANG Dong-dong, KOU Xiu-ying, WANG Xue-wen, et al. Heat property analysis of resistant starch [II] [J]. Modern Food Science and Technology, 2007, 23(2): 82-83